Journal of Water and Soil
Homepage: https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 37, No. 6, Feb.-Mar., 2024, p. 943-955

Cold Plasma Treatment Effects on Corn (*Zea mays* L.) Yield and Iron and Zinc Concentration

B. Atarodi [1*], M. Zangiabadi [1]
1- Assistant Professor of Soil and Water Research Department, Khorasan-Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: B.atarodi@areeo.ac.ir)

Received: 13-09-2023 Revised: 28-10-2023 Accepted: 11-11-2023 Available Online: 11.11.2023	**How to cite this article:** Atarodi, B., & Zangiabadi, M. (2024). Cold plasma treatment effects on corn (*Zea mays* L.) yield and iron and zinc concentration. *Journal of Water and Soil, 37*(6), 943-955. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84422.1333

Introduction

Today, it is an inevitable necessity to make use of advanced and efficient technologies in order to increase productivity and gain a better economic status. Among different methods attracted the attention of researchers for enhancement in quantity and quality yield, cold plasma technique as a modern procedure has shown a promising prospects. Despite the importance of using cold plasma in agriculture, studies have focused more on the effect of this technique on reducing microbial load in agricultural products, less on absorption of nutrients in plants. Therefore, the objectives of this experiment were to evaluate the impacts of plasma treatment of corn seeds and plasma activated water (PAW) on growth and concentration of zinc and iron in the shoots of corn.

Materials and Methods

This research was conducted as a factorial experiment based on completely randomized design (CRD) with 3 replications in a research greenhouse in agricultural and natural resources research and education center of Khorasan Razavi. The factors of experiment were three types of seed (control seeds, seeds treated with dry plasma and wet plasma), two kinds of irrigation water (distilled water and PAW) and two levels of foliar spray (without foliar spray and foliar spray with iron and zinc). Required mass of soil, was gathered, air-dried, sieved from 5 mm mesh and weighted in 6 packs. Based on the soil test values the required macro, micronutrients (except for iron and zinc) was calculated and added to the soil, and then the soil samples were moved to the pot. PLASMA BIOTEC Company located in Khorasan Razavi Park of Sciences and Technology, Mashhad, Iran performed plasma treatment of seeds and water. Plasma treated corn seeds were planted on May 18th with a density of 6 seeds in each pot. Plantlets were reduced to 2 plants after germination and establishment and irrigation was continued with desired treatments. Shoots of each pot was cut 8 weeks after sowing, 1 cm above the ground and delivered to the laboratory, where the samples were washed, dried, grounded and the concentration of zinc and iron were measured using the atomic absorption device (Perkin Elmer, 2380) in dry ash digested in 2 N HCl acid. Data were statistically analyzed by SAS statistical software (version 9.4). Comparison of means for the main effects and interactions was performed by Tukey's test at 5 percent confidence interval.

Results and Discussion

Comparison of means for the interaction effects of water × seed × foliar spray showed that the minimum concentration of iron (147.67 mg/kg) was observed in plants grown from non-treated seeds, not foliar sprayed and irrigated with non-PAW (treatment 1 in Table 7). On the other hand, plants grown from wet plasma treated seeds and received foliar spray showed the highest concentration of iron regardless of irrigation water type (treatments 10 and 12 in Table 7). Comparison of means also shows that iron concentration in plants grown from dry plasma treated seeds had no significant difference with that of non-treated seeds (treatments 1 and 5 or 2 and 6). The mean

https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84422.1333

comparison results for zinc concentrations showed that the minimum value was related to plants grown from non-treated seeds, not foliar sprayed and irrigated with non-PAW (treatment 1 in Table 8). The comparison of the simple effects of the type of seed on the concentration of zinc in shoots (Table 6) showed that wet plasma seeds caused a significant increase in the concentration of zinc. However, comparison of means for the interaction effects of water × seed × foliar spray showed that the effect of plasma treatment on zinc concentration was effective only in treatments that received foliar spray (comparison of treatment 2 with 10 in table 8). Based on these results the highest zinc concentration was observed in plants grown from wet plasma seeds and received foliar spray at the same time (treatment 12 in Table 8). In addition, the comparison of treatment 1 with treatment 4 and treatment 9 with treatment 2 indicates that in order to increase the concentration of zinc in plant, plasma treatment of seeds cannot replace the foliar spray method. Comparison of means for the interaction effects of water × seed × Foliar spray showed that the minimum yield was observed in plants grown from non- treated seeds, irrigated with non-activated water and not sprayed with iron and zinc solution (treatment 1 in Table 9). However, the similar treatment which grown from wet plasma treated seeds (treatment 9), showed significantly higher yield. Dry plasma, without foliar spray and without PAW (treatment 5) had no significant priority over the control. Plants grown from seeds treated with wet plasma and without foliar spray could not significantly show more iron and zinc content over the control, while their shoot yield was higher.

Conclusion

Based on the findings of this study, it can be inferred that irrigation with PAW and utilizing seeds treated with dry plasma exhibited no significant impact on augmenting zinc and iron content, as well as shoot yield. Conversely, wet plasma treatment, while not yielding significant enhancements in the concentration of iron and zinc within the plant, did result in increased yield. It is crucial to note that the extent of influence exerted by factors such as frequency and duration of seed exposure to plasma conditions on the observed outcomes may vary significantly. Therefore, optimizing methodology and conducting further research in this domain are imperative for a comprehensive understanding of these processes.

Keywords: Concentration, Dry plasma, Nutrition, Plant, Wet Plasma

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۲، ص. ۹۵۵-۹۴۳

تأثیر پلاسمای سرد بر عملکرد و غلظت آهن و روی در ذرت (*Zea mays* L.)

بصیر عطاردی [1*]- **مهدی زنگی آبادی** [1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۰

چکیده

امروزه در بخش کشاورزی، استفاده از فن‌آوری‌های پیشرفته و کارآمد به‌منظور افزایش بهره‌وری و کسب موقعیت اقتصادی بهتر، ضرورتی اجتناب ناپذیر به شمار می‌آید. در میان روش‌های متعددی که در جهت بهبود، افزایش کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی مورد توجه قرار گرفته‌اند، پلاسمای سرد، تکنیکی جدید، دوست‌دار محیط‌زیست و اقتصادی است که افق‌های امیدبخشی را در این حوزه ایجاد کرده است. پژوهش حاضر به‌منظور بررسی تأثیر پلاسمای سرد بر عملکرد و جذب عناصر آهن و روی در ذرت انجام گردید. فاکتورهای آزمایشی شامل سه نوع بذر (غیر پلاسمائی، پلاسمائی خشک و پلاسمائی مرطوب)، دو نوع آب آبیاری (آب مقطر و آب پلاسمائی) و دو سطح محلول‌پاشی (عدم محلول‌پاشی و محلول‌پاشی دو عنصر آهن و روی) بود که به‌صورت فاکتوریل در قالب یک طرح کاملاً تصادفی و با ۳ تکرار، در گلخانه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی اجرا شد. هشت هفته پس از کشت، اندام هوائی گیاهان مربوط به هر گلدان به‌طور مجزا از یک سانتی‌متری سطح خاک برداشت، به آزمایشگاه منتقل، عملیات شستشو، خشک کردن، اندازه‌گیری وزن خشک و اندازه‌گیری غلظت آهن و روی نمونه‌ها، توسط دستگاه جذب اتمی انجام گردید. نتایج نشان داد که مصرف آب پلاسمائی تأثیر معنی‌داری بر غلظت آهن، روی و مقدار عملکرد اندام هوائی ذرت نداشت ولی پلاسمائی نمودن بذور به روش مرطوب تأثیر معنی‌داری بر غلظت عنصر روی و میزان عملکرد داشت به‌طوری‌که بالاترین غلظت روی و مقدار عملکرد در گیاهانی مشاهده شد که بذور آنها پلاسمائی مرطوب بوده، و همزمان محلول‌پاشی شده بودند. با این وجود برای افزایش غلظت روی و آهن، پلاسمائی نمودن بذور نتوانست جایگزین روش محلول‌پاشی گردد. در مجموع و براساس نتایج حاصل، پلاسمائی نمودن مرطوب بذور، به طریقی- غیر از افزایش غلظت دو عنصر آهن و روی- می‌تواند سبب بهبود عملکرد گیاه گردد.

واژه‌های کلیدی: پلاسمای خشک، پلاسمای مرطوب، تغذیه، غلظت، گیاه

مقدمه

دو عنصر آهن و روی جزء عناصر ضروری برای رشد و نمو گیاهان از جمله ذرت (*Zea mays*) محسوب می‌شوند که نقش مهمی در افزایش کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی دارند. این دو عنصر، علاوه بر کشاورزی در حوزه پزشکی و سلامت نیز مورد توجه بوده به‌طوری‌که در برخی کشورها، محصولاتی نظیر گندم با آهن غنی‌سازی می‌شوند. مصرف کودهای شیمیائی حاوی روی و آهن در اراضی کشاورزی، از جمله روش‌های معمول برای رفع نیاز گیاهان به این عناصر می‌باشد. با این وجود، در ایران به دلیل pH بالا و آهکی بودن خاک‌ها، عناصر روی و آهن در خاک رسوب کرده، از دسترس گیاه خارج شده، که این موضوع از طرفی سبب کاهش آهن و روی قابل جذب خاک‌های کشور شده و از طرف دیگر باعث کاهش کارائی کودهای مصرفی می‌گردد (Moreno-Jiménez *et al*., 2019; Shahsavand & Eshghi, 2021). همچنین، طبق گزارش FAO حدود ۳۰ درصد از خاک‌های تحت کشت دنیا دچار کمبود روی بوده، کمبود این عنصر در حدود ۴۰ درصد از خاک‌های ایران و ۷۵ درصد از خاک‌های استان

۱- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: B.atarodi@areeo.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84422.1333

خراسان تخمین زده می‌شود (Moshiri *et al*., 2010; Najafi *et al*., 2013). کمبود آهن نیز در بسیاری از خاک‌های ایران و استان خراسان مشاهده شده به‌عنوان مثال، در حالی‌که حد بحرانی آهن در خاک ۵ تا ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نظر گرفته می‌شود غلظت آن در برخی خاک‌های تحت کشت ذرت در استان خراسان ۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Nabavi moghadam *et al*., 2013). علاوه بر این، کودهای حاوی عناصر آهن و روی که اثربخشی بیشتری دارند– مثل کلات‌های[1] آهن و روی – قیمت بالائی داشته و مصرف آن برای تمام محصولات مقرون به‌صرفه نیست. از این‌رو، یافتن روش های جایگزین برای رفع نیازهای گیاهان به دو عنصر مذکور می‌تواند اهمیت داشته باشد.

امروزه در بخش کشاورزی، استفاده از فن‌آوری‌های پیشرفته و کارآمد به‌منظور افزایش بهره‌وری و کسب موقعیت اقتصادی بهتر، ضرورتی اجتناب ناپذیر به شمار می‌آید. در میان روش‌های متعددی که در جهت بهبود، افزایش کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی مورد توجه قرار گرفته‌اند، پلاسمای سرد، تکنیکی جدید و اقتصادی است که افق‌های امیدبخشی را در این حوزه ایجاد کرده است.

با وجود اهمیت کاربرد پلاسمای سرد در کشاورزی، مطالعات بیشتر به تأثیر این تکنیک بر کاهش آلودگی و بار میکروبی محصولات کشاورزی معطوف بوده، تأثیر آن بر بهبود جذب و افزایش غلظت عناصر غذائی در بافت‌های گیاه، به‌خصوص در شرایطی نظیر خاک‌های کشور ما (که به دلیل آهکی بودن جذب عناصر غذائی مانند آهن و روی با محدودیت مواجه می‌باشد) کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. برخی محققان از جمله راندنیا و همکاران (Randeniya *et al*., 2015) و هاشیزوم و همکاران (Hashizume *et al*., 2020) گزارش کردند که با استفاده از پلاسمای سرد می‌توان بسته به هدف مورد نظر، در اطراف بذر، لایه نازک[2] هیدروفیل یا هیدروفوب (آب‌دوست یا آب‌گریز) تشکیل داد. در دو مطالعه ذکر شده، به‌ترتیب از گازهای اکسیژن و آرگون استفاده شده بود. تشکیل لایه آب‌دوست در اطراف بذر، سبب افزایش جذب آب توسط بذر و متعاقب آن بهبود جذب عناصر غذائی و میزان عملکرد می‌گردد. جیانگ و همکاران(Jiang *et al*., 2018) در ارزیابی تأثیر پلاسما با استفاده از گاز هلیم، بر وضعیت عناصر غذائی در بافت های گیاه گوجه فرنگی مشاهده کردند که تیمار کردن قبل از کشت بذور گوجه فرنگی با پلاسمای W ۸۰، باعث افزایش غلظت عناصر نیتروژن و فسفر در ریشه و ساقه گیاه گردیده، ولی بر میزان پتاسیم گیاه تأثیری معنی‌داری ندارد. ایران‌بخش و همکاران (Iranbakhsh *et al*., 2017) در بررسی تأثیر پلاسمائی نمودن بذور گندم (با دو گاز هلیم و نیتروژن در زمان‌های ۱۵ تا ۱۲۰ ثانیه) گزارش کردند که استفاده از هر دو نوع گاز ذکر شده توانست طول ریشه، ارتفاع ساقه و میزان پروتین گندم را نسبت به شرایط شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش دهد. در پژوهش دیگری، لامیچهان و همکاران (Lamichhane *et al*., 2021) اثر پلاسمادهی (با استفاده از گاز نیتروژن) بر عملکرد ذرت را مطالعه نموده، نتایج آنان نشان داد که پلاسمادهی توانست محتوی کلروفیل، عملکرد وزن خشک و میزان پروتئین محلول گیاه ذرت را افزایش دهد.

در خصوص بررسی مکانیسم تأثیر پلاسما بر عملکرد گیاهان مطالعات مختلفی انجام گردیده است. ایجاد ترک‌های میکروسکوپی در سطح بذر در نتیجه پلاسمائی نمودن بذر، باعث افزایش جذب آب و املاح معدنی توسط بذر و در نتیجه افزایش عملکرد می‌گردد. از طرفی منافذ ایجاد شده در اثر پلاسمادهی، پوسته بذر را شکننده‌تر نموده، بنابراین جوانه بذر، با صرف انرژی کمتری قادر خواهد بود پوسته بذر را بشکافد و رشد نماید (Goudarzi *et al*., 2021). ازاین طریق، پلاسمادهی بذر سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی بذر می‌گردد که این عمل باعث استقرار سریعتر گیاه گردیده، لذا گیاه از نظر رشدی در وضعیت مطلوب‌تری قرار می‌گیرد و متعاقب آن عملکرد گیاه افزایش می‌یابد. علاوه بر تأثیر مثبت پلاسمادهی بذر بر افزایش عملکرد گیاه، برخی مطالعات نشان داده‌اند پلاسمائی نمودن آب مصرفی برای گیاه نیز منجر به بهبود عملکرد کمی و کیفی گیاه می‌شود. در واقع، پلاسمادهی آب سبب تشکیل گروه‌های فعال اکسیژن نیتروژن (RONS)[3] در آب می‌گردد و با توجه به اینکه نیتروژن جزء اساسی ساختار کلروفیل و پروتئین‌های گیاهی به شمار می‌رود لذا افزایش میزان فتوسنتز و پروتئین در گیاه و متعاقبا آن افزایش عملکرد کمی از نتایج مصرف آب پلاسمائی[4] می‌باشد (Lamichhane *et al*., 2021). به عنوان یک نمونه، مطالعات لامیچهان و همکاران (Lamichhane *et al*., 2021) نشان داد که مصرف آب پلاسمائی (که با گاز نیتروژن فعال شده بود) در مقایسه با آب معمولی، غلظت نیتروژن نیتراتی گیاه ذرت را به‌طور معنی‌داری افزایش داد که در نتیجه آن، افزایش سنتز پروتئین و عملکرد بیشتر گیاه مشهود بود.

شاینسکی و همکاران (Shainsky *et al*., 2012) نشان دادند که با روش پلاسمائی می‌توان pH آب را از ۷/۵ به ۲/۵ کاهش داد. این محققان دلیل کاهش pH آب پلاسمائی را تشکیل اسیدهای نیتریک و نیترو و نیز گونه آنیونی سوپراکسید (O_2^-) در طی فرآیند پلاسمائی شدن دانسته و گزارش کردند ماندگاری کاهش pH آب پلاسمائی به نوع گاز مورد استفاده در تیمار پلاسما بستگی داشته، به‌طوری‌که اگر پلاسمائی شدن با گاز اکسیژن انجام شود کاهش pH تنها تا ۳ ساعت پس از

1- Chelates
2- Thin film
3- Reactive oxygen- nitrogen species
4- Plasma activated water (PAW)

تیمار پلاسما ماندگار است و مجدداً pH آب روند افزایشی خواهد گرفت ولی چنانچه پلاسمائی شدن با هوا انجام شود ماندگاری pH آب تا حدود ۷۰ ساعت پس از پلاسمائی شدن نیز ادامه خواهد داشت. در مطالعه مشابهی، پارک و همکاران (Park *et al*., 2013) گزارش کردند با در معرض قرار دادن دو نمونه آب با pH های ۷/۵ و ۸/۵ در شرایط پلاسمائی (به مدت ۱۲۰ ثانیه)، مقادیر pH یک واحد کاهش یافت. با این وجود، این محققان در خصوص اینکه کاهش pH آب، چه میزان پایدار است اظهار نظر نکرده‌اند ولی در خصوص پایداری گروه‌های فعال نیتروژن، گزارش کردند که این خاصیت در آب پلاسمائی بعد از گذشت دو روز از بین می‌رود. در مطالعه دیگری، میلدازن و همکاران (Mildažiene *et al*., 2020) بیان کرده‌اند که آب پلاسمائی تولید شده با هوا دارای امواج الکترومغناطیس می‌باشد که از طریق افزایش سرعت فتوسنتز و افزایش فعالیت برخی از هورمون‌های گیاهی تأثیر مثبتی بر رشد گیاه می‌گذارد. یودپیتاک و همکاران (Yodpitak *et al*., 2019) شش رقم برنج را تحت تأثیر پلاسمای سرد با استفاده از گاز آرگون قرار دادند و مشاهده کردند که درصد جوانه‌زنی، طول ریشه و ارتفاع گیاهچه در بذور تیمار شده (با زمان ۷۵ ثانیه و توان ۱۳۵ وات) نسبت به شرایط شاهد افزایش معنی‌داری نشان داد.

با عنایت به کمبود مطالعات در زمینه تأثیر پلاسما بر جذب عناصر غذائی در شرایط خاک‌های کشور ما، پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی تأثیر تیمار بذور ذرت با پلاسمای سرد، همچنین تأثیر مصرف آب پلاسمائی بر رشد و غلظت عناصر آهن و روی در اندام هوائی ذرت انجام گردید. هدف دیگر این مطالعه، بررسی امکان جایگزینی تأمین عناصر آهن و روی مورد نیاز ذرت به روش محلول‌پاشی با روش پلاسمائی بود.

مواد و روش‌ها

در این پروژه، فاکتورهای آزمایشی شامل سه نوع بذر (غیر پلاسمائی، پلاسمائی خشک و پلاسمائی مرطوب)، دو نوع آب آبیاری (آب مقطر و آب پلاسمائی) و دو سطح محلول‌پاشی (عدم محلول‌پاشی و محلول‌پاشی دو عنصر آهن و روی) بود (جدول ۱) که به صورت فاکتوریل در قالب یک طرح کاملاً تصادفی و با ۳ تکرار، در گلخانه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی اجرا شد.

آماده‌سازی خاک

حجم کافی از نمونه خاکی که دارای میزان روی و آهن کمتر از حد بحرانی بود جمع‌آوری شده، پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۵ میلی‌متری در دسته‌جات ۶ کیلوگرمی توزین شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۲ آمده است. عناصر پرمصرف و کم‌مصرف مورد نیاز (به‌جز آهن و روی) براساس نتایج آزمون خاک و از منبع اوره، سوپر فسفات تریپل، سولفات پتاسیم، کلات منگنز (Flourish Mn 9 % EDTA) به خاک‌ها افزوده شد. به این منظور، ۰/۶۵ گرم اوره، ۰/۶۵ گرم سوپر فسفات تریپل، ۱/۲ گرم سولفات پتاسیم و ۰/۳۳ گرم کلات منگنز به نمونه‌های ۶ کیلوگرمی خاک اضافه شد. برای اختلاط کامل و یکنواخت، کودها آسیاب و ابتدا به حجم کمتری از نمونه اضافه و سپس با کل خاک مخلوط شد. ضمناً ۰/۶۵ گرم اوره نیز در طی دو تقسیط در طی دوره رشد به هر گلدان اضافه گردید.

آماده‌سازی گلدان‌ها

به‌منظور ایجاد زه‌کش مناسب و نیز جلوگیری از خروج خاک از ته گلدان‌ها در حین آبیاری، در ته هر گلدان یک عدد کاغذ صافی گذاشته شد و سپس بر روی آن ۴۰۰ گرم شن درشت و ۱۰۰ گرم شن شسته شده ریخته شد، به‌طوری‌که وزن گلدان خالی و سنگریزه برای تمام گلدان‌ها مساوی گردید. به هر گلدان، ۶ کیلوگرم خاک که طبق مرحله قبلی آماده شده بود اختصاص داده شد.

جدول ۱- فاکتورهای آزمایشی و سطوح مربوط به آن
Table 1- Experimental factors and their levels

	فاکتور Factor		
	محلول پاشی Foliar spray	آب آبیاری Irrigation water	بذر Seed
سطح Level	عدم محلول‌پاشی Without foliar spray	آب مقطر Distilled water (Non- activated water)	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)
	محلول‌پاشی With foliar spray	آب پلاسمائی PAW	پلاسمائی خشک Treated with dry plasma
			پلاسمائی مرطوب Treated with wet plasma

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 2- Physico-chemical properties of soil

ویژگی خاک Soil properties	واحد Unit	مقدار Value
pH	--	8.1
رس Clay	%	13
شن Sand	%	33
کربن آلی Organic carbon	%	0.63
درصد اشباع Saturation percent	%	37
هدایت الکتریکی Electrical conductivity	dS/m	0.95
فسفر قابل دسترس Available P	mg/kg	8.4
پتاسیم قابل دسترس Available K	mg/kg	219
روی قابل دسترس Available Zn	mg/kg	0.58
منگنز قابل دسترس Available Mn	mg/kg	8.28
آهن قابل دسترس Available Fe	mg/kg	3.43

کاشت و برداشت

قبل از کشت، بذور ذرت با محلول هیپوکلریت سدیم ۳ درصد به مدت ۳۰ ثانیه ضدعفونی، بعد از آب‌کشی با آب مقطر مجددا ۳۰ ثانیه با قارچ‌کش بنومیل ۲ در هزار ضدعفونی گردید. در تاریخ ۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۰، تعداد ۶ عدد بذر ذرت، رقم سینگل کراس ۷۰۴ (پلاسمائی شده یا غیر پلاسمائی؛ بسته به تیمار) در هر گلدان (۳۷ سانتی‌متر ارتفاع، ۳۰ سانتی‌متر قطر)، کشت گردید. پلاسمائی نمودن بذور به دو روش خشک و مرطوب توسط مرکز خدمات و تحقیقات پلاسما (مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذائی، مستقر در پارک علم و فناوری مشهد) انجام شد. به طور خلاصه، برای پلاسمائی نمودن به روش خشک، بذور در دستگاه پلاسمای سرد[1] (Plasma Supply, BK 9401) قرار داده شد و پلاسمادهی به مدت ۴۰ ثانیه در مجاورت گاز اکسیژن و ۴۵ ثانیه در مجاورت هوا (در مجموع ۸۵ ثانیه) در ولتاژ ۱۰ کیلوولت و توان ۶۰ وات انجام گردید. برای پلاسمائی نمودن بذور به روش مرطوب، بذور پلاسمائی خشک به مدت ۱۲ ساعت در آب پلاسمائی نگهداری شد. آب پلاسمائی موررد استفاده در پروژه نیز توسط مرکز خدمات و تحقیقات پلاسما تهیه شد. به‌منظور پلاسمائی نمودن آب، آب معمولی (غیرپلاسمائی) در دستگاه پلاسما در تماس با لایه دی‌الکتریک و در مجاورت گاز نیتروژن قرار گرفت و پلاسمادهی تا زمانی‌که pH آن از ۷/۱ به ۶/۲ کاهش یافت ادامه یافت. استفاده از نیتروژن (به‌عنوان گاز در پلاسمادهی آب) در مقایسه با هوا، شرایط مطلوب‌تری برای تولید ترکیباتی مانند NH_3 به وجود می‌آورد که این ترکیب برای کاهش pH آب و متعاقب آن جذب بهتر عناصر غذائی مؤثرتر خواهد بود (Lamichhane *et al.*, 2021). جزئیات روش پلاسمائی نمودن بذور و تولید آب پلاسمائی، توسط محققان مختلفی از جمله لینگ و همکاران (Ling *et al.*, 2016)، پورتو و همکاران (Porto *et al.*, 2018)، لامیچهان و همکاران (Lamichhane *et al.*, 2021) و همچنین توسط راسور و نما (Rathore & Nema., 2021) توضیح داده شده است.

بعد از جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه‌ها، تعداد بوته‌های هر گلدان به ۲ عدد کاهش یافت. آبیاری گلدان‌ها، با آب مقطر یا آب پلاسمائی (بسته به تیمار) صورت گرفت. ضمنا در تیمارهای واجد آب پلاسمائی، سه نوبت آبیاری در طی فصل رشد با آب پلاسمائی صورت گرفت و سایر نوبت‌های آبیاری با آب مقطر انجام شد. رطوبت گلدان‌ها در طول دوره کشت با روش توزین، در حد ۸۵ درصد ظرفیت زراعی تأمین شد. در صورت خروج آب از گلدان‌ها، آب اضافی به ظروف پلاستیکی زیر گلدان‌ها وارد شده که مجددا برای آبیاری همان گلدان مورد استفاده قرار گرفت. برای تهیه کودهای مورد استفاده در محلول‌پاشی، از سولفات آهن و سولفات روی استفاده شد. به این منظور ۱/۵ گرم کود سولفات آهن (حاوی ۱۹٪ آهن) و ۱/۵ گرم کود سولفات روی (حاوی ۳۴٪ روی) به‌طور جداگانه در ۱/۵ لیتر آب مقطر حل گردید. کودهای مذکور از شرکت Fruitimax خریداری گردید. محلول‌پاشی عناصر آهن و روی در طی فصل رشد سه بار (در زمان ۴ برگی شدن و سپس به فواصل یک هفته‌ای) انجام شد. هشت هفته پس از کشت، اندام هوائی

1- Cold plasma generator

گیاهان مربوط به هر گلدان به‌طور مجزا از یک سانتی‌متری سطح خاک برداشت، به آزمایشگاه منتقل، عملیات شستشو، خشک کردن، اندازه‌گیری وزن خشک و اندازه‌گیری غلظت آهن و روی نمونه‌ها توسط دستگاه جذب اتمی انجام گردید. انتخاب دو عنصر آهن و روی در این مطالعه، به‌دلیل محدودیت جذب این دو عنصر در خاک‌های استان و کشور، و انتخاب ذرت به‌عنوان محصول مورد بررسی، به‌دلیل پاسخ بارز این گیاه به کمبود آهن صورت گرفت.

نمونه‌های گیاه پس از انتقال به آزمایشگاه و شستشو، به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک گردید، پس از آن، وزن خشک نمونه‌ها با ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری، نمونه‌ها کاملاً آسیاب شد. برای اندازه‌گیری عناصر آهن و روی در نمونه‌ها، پس از تهیه خاکستراز نمونه (در کوره در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۴ ساعت، با استفاده از از اسید کلریدریک ۲ نرمال هضم انجام گردید و غلظت عناصر مذکور در عصاره‌ها توسط دستگاه جذب اتمی (مدل پرکین المر، ۲۳۸۰) قرائت شد (Emami, 1996).

محاسبات آماری

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار آماری (SAS PC (version 9.4 انجام شد. مقایسه میانگین های اثرات اصلی و متقابل در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون توکی صورت گرفت.

نتایج و بحث

اثرات اصلی نوع آب مصرفی بر غلظت آهن و روی و عملکرد اندام هوائی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که غلظت آهن، روی و مقدار عملکرد اندام هوائی به‌طور معنی‌داری (P> 0.05) تحت تأثیر نوع آب مصرفی قرار نگرفت (جداول ۳، ۴ و ۵). غلظت آهن اندام هوائی از ۱۶۴/۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در گیاهان آبیاری شده با آب غیرپلاسمائی (آب مقطر) به ۱۶۶/۲۲میلی‌گرم بر کیلوگرم در گیاهان آبیاری شده با آب پلاسمائی، افزایش یافت (جدول ۶). ولی این میزان تغییر، از نظر آماری معنی‌دار نبود. غلظت روی در گیاهان شاهد ۶۵/۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که با مصرف آب پلاسمائی، به ۶۴/۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم رسید (جدول ۶). همچنین با مصرف آب پلاسمائی، عملکرد از ۲۴/۰۳ گرم در هر گلدان در گیاهان شاهد، به ۲۴/۱۰ گرم در هر گلدان در گیاهان تیمار شده با آب پلاسمائی افزایش یافت که از نظر آماری تغییر معنی‌داری محسوب نمی‌شود (جدول ۶). در مطالعه مشابهی، پورتو و همکاران (Porto *et al.*, 2018) گزارش کردند مصرف آبی که به مدت ۵ دقیقه در شرایط پلاسمائی قرار گرفته، باعث کاهش رشد گیاه سویا گردید. برخی گزارشات نیز بیان می‌کنند که انتخاب یون نامناسب و یا پتانسیل اکسایش و احیای نامناسب در زمان تهیه آب پلاسمائی می‌تواند باعث کیفیت نامناسب آب پلاسمائی گردیده و مصرف این آب، رشد گیاه را کاهش دهد (Rathore *et al.*, 2022).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثرات تیمارهای آزمایشی بر غلظت آهن اندام هوائی ذرت

Table 3- The results of analysis of variance of the effects of experimental treatments on iron concentration in shoot of corn

منابع تغییر Source of change	درجه آزادی df	میانگین مربعات M.S	مقدار F F Value	P-Value
آب Water	1	44.44	1.63	0.21
بذر Seed	2	502.78	18.47	< 0.0001
محلول‌پاشی Foliar spray	1	8341.78	306.43	< 0.0001
آب × بذر Water*Seed	2	10.77	0.4	0.68
آب × محلول‌پاشی Water* Foliar spray	1	1.78	0.07	0.80
بذر × محلول‌پاشی Seed* Foliar spray	2	104.11	3.82	0.04
آب × بذر × محلول‌پاشی Water*Seed* Foliar spray	2	45.44	1.67	0.21
خطا Error	24	27.22	-	-
ضریب تغییرات(%) (%) CV	-	3.16	-	-

جدول ٤- نتایج تجزیه واریانس اثرات تیمارهای آزمایشی بر غلظت روی اندام هوائی ذرت

Table 4- The results of analysis of variance of the effects of experimental treatments on zinc concentration in shoot of corn

منابع تغییر Source of change	درجه آزادی df	میانگین مربعات M.S	مقدار F F Value	P-Value
آب Water	1	10.03	2.09	0.16
بذر Seed	2	1356.03	282.18	< 0.0001
محلول‌پاشی Foliar spray	1	24388.01	5074.97	< 0.0001
آب × بذر Water*Seed	2	15.53	3.23	0.06
آب × محلول‌پاشی Water* Foliar spray	1	476.69	99.20	< 0.0001
بذر × محلول‌پاشی Seed* Foliar spray	2	496.70	103.36	< 0.0001
آب × بذر × محلول‌پاشی Water*Seed* Foliar spray	2	7.19	1.50	0.24
خطا Error	24	4.80	-	-
ضریب تغییرات (٪) (%) CV	-	3.40	-	-

جدول ٥- نتایج تجزیه واریانس اثرات تیمارهای آزمایشی بر عملکرد خشک اندام هوائی ذرت

Table 5- The results of analysis of variance of the effects of experimental treatments on dry yield of shoot of corn

منابع تغییر Source of change	درجه آزادی df	میانگین مربعات M. S	مقدار F F Value	P-Value
آب Water	1	0.045	0.12	0.73
بذر Seed	2	51.39	67.59	< 0.0001
محلول‌پاشی Foliar spray	1	35.10	93.46	< 0.0001
آب × بذر Water*Seed	2	0.01	0.04	0.96
آب × محلول‌پاشی Water* Foliar spray	1	0.098	0.02	0.89
بذر × محلول‌پاشی Seed* Foliar spray	2	0.47	1.26	0.30
آب × بذر × محلول‌پاشی Water*Seed* Foliar spray	2	0.005	0.01	0.99
خطا Error	24	0.37	-	-
ضریب تغییرات(٪) (%) CV	-	2.54	-	-

اثرات اصلی نوع بذر بر غلظت آهن، روی و عملکرد خشک اندام هوائی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که نوع بذر مصرفی، تأثیر معنی داری $(P< 0.05)$ بر هر سه صفت مورد بررسی یعنی غلظت آهن، روی و مقدار عملکرد اندام هوائی گیاهان داشت (جداول ۳، ۴ و ۵). غلظت آهن اندام هوائی در گیاهان حاصل از بذر معمولی (غیرپلاسمائی) از ۱۶۳/۱۷میلی‌گرم بر کیلوگرم به ۱۷۲/۳۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در گیاهان حاصل از بذر پلاسمائی مرطوب افزایش نشان داد (جدول ۶). با این وجود، غلظت آهن در گیاهان حاصل از بذور غیرپلاسمائی و پلاسمائی خشک اختلاف معنی‌داری نداشت. غلظت روی و میزان عملکرد نیز روند مشابهی داشتند به‌طوری‌که مقدار این دو صفت، در گیاهان حاصل از بذر پلاسمائی مرطوب در مقایسه با گیاهان حاصل از بذر غیرپلاسمائی به‌طور معنی‌داری بیشتر بود (جدول ۶).

جدول ٦- مقایسه میانگین اثرات ساده فاکتورها بر غلظت آهن و روی و عملکرد خشک اندام هوائی ذرت

Table 6- Comparison of means for direct effects of factors on iron and zinc concentration at corn shoots

فاکتور Factor	سطح فاکتور Factor level	غلظت آهن Fe Concentration (mg kg^{-1})	غلظت روی Zn Concentration (mg kg^{-1})	عملکرد Shoot yield (g pot^{-1})
آب آبیاری Iriigation Water	آب مقطر Distilled water (Non- activated water)	164.00 ^{a}	65.05 ^{a}	24.03 ^{a}
	آب پلاسمائی PAW	166.22 ^{a}	64.00 ^{a}	24.10 ^{a}
بذر Seed	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	163.17 ^{b}	56.50 ^{c}	23.19 ^{b}
	پلاسمائی خشک Treated with dry plasma	15 9.83 ^{b}	60.51 ^{b}	23.27 ^{b}
	پلاسمائی مرطوب Treated with wet plasma	172.34 ^{a}	76.58 ^{a}	25.75 ^{a}
محلول‌پاشی Foliar spray	عدم محلول‌پاشی Without foliar spray	149.89 ^{b}	38.50 ^{b}	23.08 ^{b}
	محلول‌پاشی With foliar spray	180.33 ^{a}	90.55 ^{a}	25.06 ^{a}

Means followed by different letters are significantly different (P<0.05) according to Tukey's LSD test.

تأثیر مثبت پلاسمائی نمودن بذور (در مجاورت هوا، توان ۶۰ وات و مدت زمان ۱۸۰ ثانیه) بر افزایش عملکرد گندم توسط صابری و همکاران (Saberi *et al.*, 2022) گزارش شده است. این محققان دریافتند که پلاسمائی نمودن بذور از طریق بهبود برخی خصوصیات بیوشیمیائی و فیزیولوژیکی نظیر افزایش میزان فتوسنتز سبب بهبود جذب عناصر غذائی و افزایش عملکرد می‌گردد. در مطالعه مشابهی در خصوص تأثیر پلاسما بر جذب عناصر غذائی، جیانگ و همکاران (Jiang *et al.*, 2018) افزایش عملکرد گوجه فرنگی تحت تأثیر پلاسما را به افزایش جذب عناصر نیتروژن و فسفر مرتبط دانستند. آنان دریافتند که افزایش جذب این دو عنصر در شرایط پلاسمائی، بر اثر افزایش حجم ریشه و سطح برگ صورت گرفت. صفری و همکاران (Safari *et al.*, 2017) گزارش کردند که قرار دادن یک دقیقه‌ای بذور فلفل در معرض پلاسمای سرد (با ولتاژ ۱۵ کیلوولت، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و توان ۱۰۰ وات)، سبب افزایش معنی‌دار سطح برگ گیاهان تیمار شده نسبت به شاهد گردیده ولی زمان‌های بیش از یک دقیقه نه تنها خصوصیات رشدی را بهبود نداده، بلکه برخی از صفات مورد بررسی نظیر طول ریشه و ساقه را نیز کاهش داد.

اثرات اصلی محلول‌پاشی بر غلظت آهن و روی و عملکرد خشک اندام هوائی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تیمار محلول‌پاشی باعث افزایش معنی‌دار غلظت آهن، روی و میزان عملکرد در مقایسه با گیاهان شاهد گردید (جداول ۳، ۴ و ۵). بر اساس نتایج مقایسات میانگین (جدول ۶) اعمال محلول‌پاشی، غلظت آهن، روی و مقدار عملکرد را به‌ترتیب ۲۰، ۱۳۵ و ۹ درصد نسبت به گیاهان شاهد افزایش داد. آرزمجو و همکاران (Arazmjoo *et al.* 2018) تأثیر محلول‌پاشی عناصر آهن و روی (از منبع سولفات این دو عنصر) را بر برخی خصوصیات سه رقم گندم روشن، بک کراس روشن، بم و افق مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که محلول‌پاشی عناصر مذکور از طریق افزایش طول سنبله و تعداد دانه در سنبله باعث افزایش عملکرد ارقام مورد بررسی گردید. تأثیر مثبت محلول‌پاشی آهن و روی با غلظت‌های به‌ترتیب ۲/۵ و ۵ در هزار، در افزایش عملکرد ذرت نیز گزارش شده است (Yousefpour & Farajzadeh Memari Tabrizi, 2018).

اثر متقابل آب × بذر × محلول‌پاشی بر غلظت آهن در اندام هوائی

مقایسه میانگین اثرات متقابل آب × بذر × محلول‌پاشی نشان داد کمترین غلظت آهن (۱۴۷/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در شرایط عدم محلول‌پاشی و در گیاهان حاصل از بذور غیرپلاسمائی که با آب غیرپلاسمائی آبیاری شده بودند مشاهده گردید (تیمار شماره ۱، جدول ۷). در مقابل گیاهان حاصل از بذور پلاسمائی مرطوب و در شرایط محلول‌پاشی – صرف نظر از اینکه با کدام نوع آب آبیاری شده باشند –

بیشترین غلظت آهن و بیشترین عملکرد را داشتند (تیمارهای شماره ۱۰ و ۱۲، جدول ۷). این نتایج بیانگر آن است که آب پلاسمائی در مقایسه با آب غیرپلاسمائی، تأثیری بر افزایش عملکرد ندارد.

نتایج مقایسات میانگین نشان می‌دهند که غلظت آهن در گیاهان حاصل از بذور پلاسمائی خشک و بذور معمولی (غیرپلاسمائی) تفاوت معنی‌داری ندارد. به عبارتی، بذور پلاسمائی شده به روش خشک در مقایسه با بذور غیر پلاسمائی، نتوانست بر افزایش غلظت آهن گیاه تأثیر معنی‌داری داشته باشد (تیمار شماره ۱ و ۵ یا ۲ و ۶).

رسولی و همکاران (Rasooli *et al.*, 2021) گزارش کردند بسته به مدت زمان قرار گرفتن بذور در شرایط پلاسمائی، تیمار پلاسمائی می‌تواند اثرات متفاوتی بر جذب عناصر غذائی توسط گیاه داشته باشد. آنان در مطالعه خود مشاهده کردند که قرار گرفتن بذور زیره سبز (*Cuminum cyminum*) به مدت ۵ دقیقه در شرایط پلاسمائی، توانست مقدار جذب عناصر کلسیم و آهن توسط این گیاه را افزایش دهد در صورتی که قرارگیری ۱۰ دقیقه‌ای بذور در شرایط پلاسمائی، بر جذب آهن تأثیر معنی‌داری نداشته، حتی جذب عناصر کلسیم و منیزیم را کاهش داد.

اثر متقابل آب × بذر × محلول‌پاشی بر غلظت روی در اندام هوائی

نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرات متقابل آب × بذر × محلول پاشی بر غلظت روی اندام هوائی نشان داد که کمترین غلظت روی مربوط به تیمار بذر غیرپلاسمائی، آب غیر پلاسمائی و عدم محلول‌پاشی بود (تیمار شماره ۱، جدول ۸).

اگرچه مقایسه میانگین اثرات ساده نوع بذر مصرفی بر غلظت روی در اندام هوائی (جدول ۶) نشان داد که پلاسمائی نمودن مرطوب بذور، باعث افزایش معنی‌دار غلظت روی گردید با این وجود، مقایسات میانگین اثر متقابل آب × بذر × محلول‌پاشی بر غلظت روی اندام هوائی نشان داد که پلاسمائی نمودن مرطوب بذور، تنها در تیمارهائی که محلول‌پاشی انجام گرفته باعث افزایش معنی‌دار غلظت روی در اندام هوائی می‌گردد (مقایسه تیمار شماره ۲ با شماره ۱۰، جدول ۸) و در تیمارهائی که محلول‌پاشی صورت نگرفته پلاسمائی نمودن مرطوب بذور تاثیر معنی‌داری بر افزایش غلظت روی در اندام هوائی نداشت (مقایسه تیمار شماره ۱ با شماره ۹، جدول ۸).

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل آب × بذر × محلول‌پاشی بر غلظت آهن در اندام هوائی

Table 7- Mean comparison of the interaction effects of water × seed × Foliar spray on iron concentration in shoots (means that have no common letters, showed significant difference at 5% level of Tukey test)

شماره تیمار Treatment No.	بذر Seeds	آب آبیاری Irrigation Water	محلول‌پاشی Foliar Spray	غلظت آهن Fe Conc. (mg kg^{-1})
1	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب مقطر Non- activated water	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	147.67 ^{c}
2	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب مقطر Non- activated water	محلول‌پاشی With foliar spray	174.33 ^{b}
3	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب پلاسمائی PAW	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	155.00 ^{c}
4	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب پلاسمائی PAW	محلول‌پاشی With foliar spray	175.67 ^{b}
5	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب مقطر Non- activated water	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	142.68 ^{c}
6	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب مقطر Non- activated water	محلول‌پاشی With foliar spray	176.33 ^{b}
7	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب پلاسمائی PAW	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	143.67 ^{c}
8	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب پلاسمائی PAW	محلول‌پاشی With foliar spray	176.66 ^{b}
9	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب مقطر Non- activated water	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	156.68 ^{c}
10	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب مقطر Non- activated water	محلول‌پاشی With foliar spray	186.33 ^{a}
11	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب پلاسمائی PAW	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	153.67 ^{c}
12	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب پلاسمائی PAW	محلول‌پاشی With foliar spray	192.67 ^{a}

Means followed by different letters are significantly different (P<0.05) according to Tukey’s LSD test.

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل آب × بذر × محلول‌پاشی بر غلظت روی در اندام هوائی

Table 8- Mean comparison of the interaction effects of water × seed × Foliar spray on zinc concentration in shoots (means that have no common letters, showed significant difference at 5% level of Tukey test)

شماره تیمار Treatment No.	بذر Seeds	آب آبیاری Irrigation Water	محلول‌پاشی Foliar Spray	غلظت روی Zn Conc. ($mg\ kg^{-1}$)
1	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب مقطر Non- activated water	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	40.60 d
2	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب مقطر Non- activated water	محلول‌پاشی With foliar spray	76.11 c
3	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب پلاسمائی PAW	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	29.00 e
4	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب پلاسمائی PAW	محلول‌پاشی With foliar spray	80.33 c
5	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب مقطر Non- activated water	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	41.68 d
6	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب مقطر Non- activated water	محلول‌پاشی With foliar spray	79.30 c
7	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب پلاسمائی PAW	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	33.33 e
8	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب پلاسمائی PAW	محلول‌پاشی With foliar spray	87.56 b
9	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب مقطر Non- activated water	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	45.67 d
10	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب مقطر Non- activated water	محلول‌پاشی With foliar spray	107.11 a
11	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب پلاسمائی PAW	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	40.67 d
12	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب پلاسمائی PAW	محلول‌پاشی With foliar spray	113.00 a

Means followed by different letters are significantly different ($P<0.05$) according to Tukey's LSD test.

بر همین اساس، بالاترین غلظت روی در گیاهانی مشاهده شد که بذور آنها پلاسمائی مرطوب بوده، و همزمان محلول‌پاشی نیز شده بودند (تیمار شماره ۱۲، جدول ۸). این نتایج مشخص می‌نماید که تأثیر محلول‌پاشی در افزایش غلظت روی در حضور بذر پلاسمائی مرطوب در مقایسه با بذر غیرپلاسمائی به طور معنی‌داری بیشتر است (مقایسه تیمار ۱۲ با تیمار۴).

همچنین، مقایسه تیمار ۱ با تیمار ۴ و تیمار ۹ با تیمار ۲ بیانگر آن است که پلاسمائی نمودن بذور، نمی‌تواند به منظور افزایش غلظت روی در گیاه، جایگزین روش محلول‌پاشی گردد.

اثر متقابل آب × بذر × محلول‌پاشی بر عملکرد خشک اندام هوائی

نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرات متقابل آب × بذر × محلول پاشی بر عملکرد اندام هوائی نشان داد که کمترین عملکرد به میزان ۲۲/۶۷۱۸ گرم بر گلدان در شرایط عدم محلول‌پاشی و در گیاهان حاصل از بذور غیرپلاسمائی که با آب غیرپلاسمائی آبیاری شده بودند مشاهده گردید (تیمار شماره ۱، جدول ۹). در صورتی‌که تیمار شماره ۱ (بذر غیر پلاسمائی، آب غیر پلاسمائی و عدم محلول‌پاشی) با تیمارهای مشابهی که به جای بذر غیر پلاسمائی، بذر پلاسمائی خشک یا مرطوب داشته (تیمار شماره ۵ با تیمار شماره ۹) مقایسه شود مشخص می‌گردد که پلاسمائی نمودن بذور به روش مرطوب می‌تواند باعث افزایش معنی‌دار عملکرد گیاه گردد در صورتی‌که پلاسمائی نمودن بذور به روش خشک تأثیر معنی‌داری بر عملکرد ندارد.

به‌نظر می‌رسد که پلاسمائی نمودن بذور به روش مرطوب نتوانست به تنهائی (بدون انجام محلول‌پاشی) غلظت‌های دو عنصر آهن و روی را به‌طور معنی‌داری افزایش دهد ولی مقدار عملکرد خشک اندام هوائی گیاه را افزایش داد. از این‌رو، می‌توان استنباط کرد که پلاسمائی نمودن مرطوب بذور به طریقی- غیر از بهبود جذب دو عنصر آهن و روی- سبب افزایش عملکرد گردیده است. در تحقیقات مشابهی توسط لینگ و همکاران (Ling *et al*., 2016) افزایش عملکرد بادام زمینی در اثر تیمار بذور آن با پلاسما، گزارش شده است. این محققان، افزایش وزن ریشه، قطر ساقه و سطح برگ بادام زمینیِ تحت تأثیر تیمار پلاسمائی را در مقایسه با گیاهان شاهد گزارش کردند. آنان مشاهده کردند که درگیاهان تیمار شده با پلاسما، غلظت نیتروژن برگ و میزان کلروفیل افزایش معنی‌داری داشته، افزایش عملکرد را به افزایش غلظت نیتروژن و کلروفیل نسبت دادند.

نتیجه‌گیری

از نتایج این پژوهش می‌توان نتیجه‌گیری نمود که کاربرد آب پلاسمائی و پلاسمائی نمودن بذر ذرت به روش خشک، تأثیری بر افزایش غلظت عناصر آهن، روی و مقدار عملکرد ذرت ندارد. پلاسمائی نمودن مرطوب، گرچه سبب افزایش غلظت آهن و روی گیاه نگردید ولی عملکرد را افزایش داد. ذکر این نکته ضروری است که دامنه تأثیر عواملی نظیر فرکانس مورد استفاده و مدت زمان قرارگیری بذور در شرایط پلاسمائی بر نتایج حاصله بسیار گسترده بوده، لذا بهینه‌سازی روش کار و انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه ضروری می‌باشد.

جدول ۹- مقایسه میانگین اثر متقابل آب × بذر × محلول‌پاشی بر عملکرد خشک اندام هوائی

Table 9- Mean comparison of the interaction effects of water × seed × Foliar spray on dry weight (means that have no common letters, showed significant difference at 5% level of Tukey test)

شماره تیمار Treatment No.	بذر Seeds	آب آبیاری Irrigation Water	محلول‌پاشی Foliar Spray	عملکرد اندام هوائی Shoots D.Wt (g pot^{-1})
1	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب مقطر Non- activated water	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	22.18 ^{c}
2	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب مقطر Non- activated water	محلول‌پاشی With foliar spray	24.07 ^{b}
3	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب پلاسمائی PAW	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	22.27 ^{c}
4	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب پلاسمائی PAW	محلول‌پاشی With foliar spray	24.24 ^{b}
5	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب مقطر Non- activated water	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	22.51 ^{c}
6	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب مقطر Non- activated water	محلول‌پاشی With foliar spray	24.04 ^{b}
7	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب پلاسمائی PAW	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	22.43 ^{c}
8	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب پلاسمائی PAW	محلول‌پاشی With foliar spray	24.10 ^{b}
9	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب مقطر Non- activated water	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	24.50 ^{b}
10	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب مقطر Non- activated water	محلول‌پاشی With foliar spray	26.91 ^{a}
11	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب پلاسمائی PAW	بدون محلول‌پاشی Without foliar spray	24.61 ^{b}
12	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب پلاسمائی PAW	محلول‌پاشی With foliar spray	26.98 ^{a}

Means followed by different letters are significantly different ($P<0.05$) according to Tukey's LSD test.

References

1. Arazmjoo, E., Behdani, M.A., Mahmoodi, S., & Sadeghzade, B. (2018). Response of some bread wheat cultivars to foliar application of Zn and Fe different forms in two Locations with different soil properties. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *16*(1), 203-216. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/gsc.v16i1.61570
2. Emami, A. (1996). Methods of plant analysis, *982*, 80-93. (In persian)
3. Goudarzi, S., Ghafoorifard, H., Ghasemi, S.A., & Mazandarani, A. (2021). *The effect of atmospheric cold plasma on the rates of germination and root length and shoot length of sesame seed*. P1-7. In 27th Iranian nuclear conference, 30 February 2021. Nuclear Society of Iran, Mashhad, Iran.
4. Hashizume, H., Kitano, H., Mizuno, H., Abe, A., Yuasa, G., Tohno, S., Tanaka, H., Ishikawa, K., Matsumoto, S., Sakakibara, H., Nikawa, S., Maeshima, M., Mizuno, M., & Hori, M. (2020). Improvement of yield and grain quality by periodic cold plasma treatment with rice plants in a paddy field. *Plasma Processes and Polymers*, *18*(1), 1-11. https://doi.org/10.1002/ppap.202000181
5. Iranbakhsh, A., Ghoranneviss, M., Oraghi Ardebili, Z., Oraghi Ardebili, N., Hesami Tackallou, S., & Nikmaram, H. (2017). Non-thermal plasma modified growth and physiology in *Triticum aestivum via* generated signaling molecules and UV radiation. *Biologia Plantarum*, *61*, 702–708. https://doi.org/10.1007/s10535-016-0699-y
6. Jiang, J., Li, J., & Dong, Y. (2018). Effect of cold plasma treatment on seedling growth and nutrient absorption of tomato. *Plasma Science and Technology*, *20*(4), 1-4. https://doi.org/10.1088/2058-6272/aaa0bf

7- Lamichhane, P., Veerana, M., Lim, J.S., Mumtaz., S., Shrestha, B., Kaushik, N.K., Park, G., & Choi, E.H. (2021). Low-temperature plasma-assisted nitrogen fixation for corn plant growth and development. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(10), 1-20. https://doi.org/10.3390/ijms22105360

8. Ling, L., Jiangang, L., Minchong, S., Jinfeng, H., Hanliang, S., Yuanhua, D., & Jiafeng, J. (2016). Improving seed germination and peanut yields by cold plasma treatment. *Plasma Science and Technology*, *18*(10), 1027-1033. https://10.1088/1009-0630/18/10/10

9. Mildaziene, V, Ivankov, A., Pauzaite, G., Naucienė, Z., Zukiene, R., Degutyte-Fomins, L., Pukalskas, A., Venskutonis, P., Filatova, I., & Lyushkevich, V. (2020). Seed treatment with cold plasma and electromagnetic field induces changes in red clover root growth dynamics, flavonoid exudation, and activates nodulation. *Plasma Processes and Polymers*, *18*(1), 1-10. https://doi.org/10.1002/ppap.202000160

10. Moreno-Jiménez, E., Plaza, C., Saiz, H., Manzano, R., Flagmeier, M., & Maestre, M. (2019). Aridity and reduced soil micronutrient availability in global drylands. *Nature Sustainability*, *2*(5), 371-377. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0262-x

11. Moshiri, F., Ardalan, M., Tehrani, M.M., & Savaghebi, Gh. (2010). Zinc efficiency of wheat cultivars in a calcareous soil with low zinc status. *Journal of Water and Soil*, *24*(1), 145-153. (In Persian with English abstract)

12. Nabavi Moghadam, R., Saberi, M.H., & Sayyari, M.H. (2013). Effect of soil application of iron and manganese sulphate on quantitative and qualitative characteristics of forage maize hybrid single cross 704. *Journal of Crop Improvement*, *15*(2), 75-86. https://doi.org/10.22059/jci.2013.36100

13. Najafi-Ghiri, M., Ghasemi-Fasaei, R., & Farrokhnejad, E. (2013). Factors affecting micronutrient availability in calcareous soils of Southern Iran. *Arid Land Research and Management*, *27*(3), 203-215. https://doi.org/10.1080/15324982.2012.719570

14. Porto, C. L., Ziuzina, D., Los, A., Boehm, D., Palumbo, F., Favia, P., Tiwari, B., Bourke, P., & Cullen, P. (2018). Plasma activated water and airborne ultrasound treatments for enhanced germination and growth of soybean. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *49*, 13-19. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.013

15-Randeniya, L.K., & Groot, G. (2015). Non-Thermal plasmatreatment of agricultural seeds for stimulation of germination, removal of surface contamination and other benefits: A review. *Plasma Processes and Polymers*, *12*, 608-623. https://doi.org/10.1002/ppap.201500042

16. Rasooli, Z., Barzin, G., Davari Mahabadi , T., & Entezari, M. (2021). Stimulating effects of cold plasma seed priming on germination and seedling growth of cumin plant. *South African Journal of Botany*, *142*, 106-113. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.06.025

17. Rathore, V., Tiwari, B., & Nema, S. (2022). Treatment of pea seeds with plasma activated water to enhance germination, plant growth, and plant composition. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, *42*(1), 109-129. https://doi.org/10.1007/s11090-021-10211-5

18. Rathore, V., & Nema, S.K. (2021). Optimization of process parameters to generate plasma activated water and study of physicochemical properties of plasma activated solutions at optimum condition. *Journal of Applied Physics*, *129*, 901-924. https://doi.org/10.1063/5.0033848

19. Saberi, M., Ghomi, H., & Andreasen, C. (2022). Eco-friendly approach to improve traits of winter wheat by combining cold plasma treatments and carbo.nization of subtropical biomass waste. *Scientific Reports*, *12*, 1-12. https://doi.org/10.1038/s41598-022-15286-4.

20. Safari, N., Iranbakhsh. A., & Oraghi ardeblil, Z. (2017). Non-thermal plasma modified growth and differentiation process of *Capsicum annuum* PP805 Godiva in in vitro conditions. *Plasma Science and Technology*, *19*(5), 1-6. https://doi.org/10.1088/2058-6272/aa57ef

21. Shainsky, N., Dobrynin, D., Ercan, U., Joshi, S.G., Ji, H., Brooks, A., Fridman, G., Cho, Y., Fridman, A., & Friedman, G., 2012. Plasma acid: water treated by dielectric barrier discharge. *Plasma Processes and Polymers*, *9, 6-13.* https://doi.org/10.1002/ppap.201100084

22. Shahsavandi, F., & Eshghi, S. (2021). Effects of bicarbonate and Fe sources on vegetative growth and physiological traits of four grapevine cultivars. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *52*(20), 2401-2413. https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1928172

23. Yodpitak, S., Mahatheeranont, S., Boonyawan, D., Sookwong, Ph., Roytrakul, S., & Norkaew, O. (2019). Cold plasma treatment to improve germination and enhance the bioactive phytochemical content of germinated brown rice. *Food Chemistry*, *289*, 328-339. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.061

24. Yousefpour, A., & Farajzadeh Memari Tabrizi, E. (2018). Evaluation of micronutrient application at different growth stages on yield and yield components and grain quality of Sweet Corn. *Journal of Crop Ecophysiology*, *12*(2), 287-302. (In Persian with English abstract)